"نشریه علوم زراعی ایران"
جلد بیست و ششم، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۳

مقاله پژوهشی

DOR: 20.1001.1.23223243.2021.19.1.29.0

اثر مصرف سیلیکون بر ویژگی‌های فیزیولوژیکی و عملکرد دانه گیاه کینوا (*Chenopodium quinoa* Willd.) در شرایط تنش خشکی

Effect of silicon application on physiological traits and seed yield of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) under drought stress conditions

مصطفی علی‌نقی‌زاده[۱] و محمد عظیمی گندمانی[۲]

چکیده

مصطفی علی‌نقی‌زاده، م.، و م. عظیمی گندمانی. ۱۴۰۳. اثر مصرف سیلیکون بر ویژگی‌های فیزیولوژیکی و عملکرد دانه گیاه کینوا (*Chenopodium quinoa* Willd.) در شرایط تنش خشکی**. نشریه علوم زراعی ایران. ۲۶ (۲): ۲۰۴ -۱۸۷.**

به منظور ارزیابی پاسخ‌های فیزیولوژیکی، بیوشیمیایی و عملکردی کینوا به مصرف سیلیکون در شرایط تنش خشکی، آزمایشی به‌صورت کرت‌های خرد شده در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در سال ۱۴۰۲ در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه پیام نور مرکز گندمان بروجن واقع در استان چهارمحال و بختیاری اجرا شد. تیمارهای آزمایشی شامل آبیاری در چهار سطح (۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی؛ به‌ترتیب تنش خشکی شدید، متوسط، ملایم و بدون تنش) به‌عنوان کرت‌های اصلی و کود حاوی سیلیکون در چهار سطح (صفر، یک، دو و سه لیتر در هکتار) به‌عنوان کرت‌های فرعی در نظر گرفته شدند. نتایج نشان داد با کاهش مقدار آب آبیاری، از محتوای رنگدانه‌های فتوسنتزی، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و میزان عملکرد گیاه کاسته شد، ولی مصرف کود سیلیکون باعث کاهش اثرات منفی تنش شد. در تیمار ۴۰ درصد (تنش خشکی شدید) و مصرف سه لیتر در هکتار سیلیکون، محتوای کلروفیل a، کلروفیل b، کاروتنوئیدها و کلروفیل کل نسبت به عدم مصرف سیلیکون به‌ترتیب ۱۰۳، ۵۲، ۱۱۷ و ۹۹ درصد بیشتر بود. در تیمار ۴۰ درصد و مصرف سه لیتر در هکتار سیلیکون، فعالیت آنزیم‌های کاتالاز، سوپراکسیددیسموتاز و پراکسیداز نسبت به عدم مصرف سیلیکون به‌ترتیب ۲٦٤، ٦٥ و ۱۷٦ درصد بیشتر بود. در تیمار ۴۰ درصد و مصرف سه لیتر در هکتار سیلیکون بیشترین میزان پرولین و کربوهیدرات‌های محلول (به‌ترتیب ۱/٥٦ میکرومول بر گرم وزن تر و ۲۰/۷ میلی‌گرم در گرم وزن تر) به‌دست آمد. همچنین در تیمار آبیاری ۴۰ درصد و مصرف سه لیتر در هکتار سیلیکون در مقایسه با تیمار ۱۰۰ درصد و عدم مصرف سیلیکون، محتوای آب نسبی برگ، عملکرد دانه و زیست‌توده به‌ترتیب ۵۱، ۴۰ و ۹ درصد بیشتر بود. در تیمار ۴۰ درصد ظرفیت زراعی و مصرف سه لیتر در هکتار سیلیکون عملکرد دانه با ۱۲۵۰ کیلوگرم در هکتار، کاهش عملکرد کمتری نسبت به عدم مصرف سیلیکون داشت. در کلیه سطوح آبیاری، مصرف سیلیکون باعث بهبود صفات گیاهی کینوا شد، ولی برای محتوای کلروفیل a، کلروفیل کل، فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و پراکسیداز و محتوای آب نسبی برگ، نسبت به تیمار ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی (بدون تنش)، دارای اثرگذاری مثبت بیشتری بود. نتایج این آزمایش نشان داد که هرچند تنش خشکی باعث کاهش خصوصیات فیزیولوژیکی و عملکردی کینوا شد، ولی با مصرف کود سیلیکون اثرات منفی تنش خشکی به طور چشمگیری کاهش یافت.

واژه‌های کلیدی: تنش خشکی، عملکرد دانه، فعالیت آنزیمی، کینوا و محتوای آب نسبی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۲۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۰۵ این مقاله مستخرج از طرح پژوهشی شماره ۱۱/۰۹/۶۱۹۰/د/۴۰۰ مصوب دانشگاه پیام نور می‌باشد

۱- استادیار گروه کشاورزی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران (مکاتبه کننده، alinaghizadeh62@pnu.ac.ir ✉)

۲- استادیار گروه کشاورزی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

Effect of silicon application on physiological traits and seed yield of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) under drought stress conditions

Alinaghizadeh, M.[1] and Azimi Gandomani, M.[2]

ABSTRACT

Alinaghizadeh, M. and Azimi Gandomani, M. 2025. Effect of silicon application on physiological traits and seed yield of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) under drought stress conditions. **Iranian Journal of Crop Sciences. 26(2): 187-204. (In Persian).**

Introduction: In recent years, silicon (Si) fertilizer has attracted attention of farmers and researchers as a potential mitigator for adverse effect of drought stress, offering means to enhance the resilience and functional traits of agricultural crops. Numerous studies have demonstrated the positive effects of Si application in alleviating water deficiency, though most have utilized foliar spraying methods. Soil application (fertilization) may serve as a suitable alternative for utilizing this beneficial element (Mostofa *et al.*, 2021). This study aimed to determine the beneficial role of silicon as a plant biostimulant through fertilization, reducing water stress effect and improving the biochemical and physiological characteristicsas well as yield of quinoa.

Materials and Methods: To investigate the physiological, biochemical, and yield responses of quinoa to silicon fertilization under drought stress conditions, a field experiment was conducted during the 2023–2024 growing season at the Gandoman research farm of Payame Noor University, Chaharmahal and Bakhtiari province, Iran. The experiment was carried out as split-plot arrangements in randomized complete block design with three replications. The experimental treatments included irrigation at four levels in the main plots (40%, 60%, 80%, and 100% field capacity; defined as severe, moderate, mild and full irrigation, respectively) and silicon fertilizer at four levels (0, 1, 2, and 3 $l.ha^{-1}$) in the sub-plots. Analysis of variance was performed using SAS software and the means were compared using LSD test at the 5% probability level. Graphs were made using Excel software.

Results: The results indicated that reducing irrigation levels led to a decrease in photosynthetic pigments, antioxidant enzyme activities, and seed yield, while the application of silicon fertilizer mitigated the negative effects of the drought stress. Under the 40% field capacity irrigation level, the chl_a, chl_b, carotenoids and total chlorophyll content in the treatment with 3 $l.ha^{-1}$ of silicon were higher by 103%, 52%, 117%, and 99%, respectively, compared to the control (without silicon). Additionally, the activity levels of catalase, superoxide dismutase, and peroxidase enzymes in the 3 $l.ha^{-1}$ of silicon level were higher by 264%, 65%, and 176%, respectively, than in the control under the 40% field capacity irrigation condition. Moreover, in the 40% field capacity irrigation level, compared to the 100% field capacity level, the increase in relative water content of leaves, seed yield, and biomass in the treatment with 3 $l.ha^{-1}$ of silicon was higher by 51%, 40%, and 9%, respectively, than the control without silicon application. Based on the results, the treatment with 40% field capacity and 3 $l.ha^{-1}$ of silicon (equivalent to 1250 $kg.ha^{-1}$) prevented more effectively the reduction in seed yield. Under the 40% field capacity treatment (severe drought stress), the highest proline content (1.56 $\mu mol.g^{-1}$ FW) and soluble carbohydrate content (20.7 $mg.g^{-1}$ FW) were observed with the application of 3 $l.ha^{-1}$ of silicon.

Conclusion: Overall, the results of this experiment demonstrated that drought stress led to reductions in photosynthetic pigments (chl_a, chl_b, and carotenoids by 29%, 79%, and 38%, respectively, compared to the control), relative leaf water content (by 11% compared to the control), seed yield (by 49% compared to the control), and biomass (by 68% compared to the control). Under drought conditions, antioxidant enzyme activity, proline, and soluble carbohydrate content increased. Moreover, silicon fertilization mitigated the negative effects of drought stress. In conclusion, the results of this experiment showed that although drought stress led to reduction in physiological traits and seed yield, however, the application of silicon fertilizer significantly lessened the negative effects of drought stress.

Key words: Drought stress, Enzyme activity, Quinoa, Relative water content and Seed yield

Received: July, 2024 **Accepted: September, 2024**

1. Assistant Prof., Agriculture Department, Faculty of Technical and Engineering, Payame Noor University, Tehran, Iran (Corresponding author, ✉ alinaghizadeh62@pnu.ac.ir)
2. Assistant Prof., Agriculture Department, Faculty of Technical and Engineering, Payame Noor University, Tehran, Iran

مقدمه

کینوا (*Chenopodium quinoa* Willd.) یک شبه‌غله است که دارای ویژگی‌های ارزشمند تغذیه‌ای و قابلیت رشد در شرایط مختلف محیطی است. همانند بسیاری از گیاهان زراعی، تنش خشکی تهدیدی جدی برای رشد، عملکرد و کیفیت کینوا محسوب می‌شود (Angeli *et al.*, 2020). تنش خشکی باعث تغییرات فیزیولوژیکی مختلفی در گیاه می‌شود که از جمله می‌توان به تغییرات فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، محتوای کربوهیدرات‌های محلول و تجمع پرولین اشاره کرد (Ghaffari *et al.*, 2019).

در شرایط تنش خشکی، تولید گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) مانند رادیکال‌های سوپراکسید، پراکسید هیدروژن و رادیکال‌های هیدروکسیل افزایش می‌یابند که باعث آسیب به اجزای سلول از جمله لیپیدها، پروتئین‌ها و اسیدهای نوکلئیک می‌شوند. در این شرایط فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی گیاه افزایش می‌یابد. تنش خشکی باعث افزایش فعالیت آنزیم‌های سوپراکسید دیسموتاز (SOD)، کاتالاز (CAT) و پراکسیداز (POD) در کینوا می‌شود که یک پاسخ انطباقی گیاه برای کاهش آسیب اکسیداتیو و حفظ تعادل و پایداری سلولی محسوب می‌شود (Iqbal *et al.*, 2018). تنش خشکی اغلب باعث تجمع کربوهیدرات‌های محلول می‌شود که به‌دنبال آن تداوم جذب آب، باعث حفظ آماس سلولی و کاهش اثرات تنش در گیاه می‌شود (Gaur *et al.*, 2021). در شرایط تنش خشکی، افزایش محتوای پرولین یک پاسخ بارز به تنش اسمزی است که باعث محافظت از ساختارهای سلولی، حفظ تعادل اسمزی و بازیابی گیاه پس از وقوع تنش می‌شود. سنتز پرولین در اثر تنش خشکی تنظیم شده و به‌عنوان یک اسمولیت، چاپرون مولکولی و آنتی‌اکسیدان، به افزایش تحمل گیاه به تنش خشکی کمک می‌کند (Zhang *et al.*, 2017).

در سال‌های اخیر، کودهای حاوی سیلیکون (Si) به‌عنوان کاهش‌دهنده بالقوه اثر منفی تنش خشکی مورد توجه قرار گرفته است. استفاده از این نوع کودها باعث افزایش انعطاف‌پذیری گیاه در شرایط تنش خشکی و بهبود ویژگی‌های عملکردی گیاهان زراعی می‌شوند. عنصر سیلیکون باعث افزایش پایداری غشای سلولی، کاهش پراکسیداسیون لیپیدی غشا و تقویت سیستم دفاعی آنتی‌اکسیدانی در گیاه می‌شود (Teixeira *et al.*, 2022). نتایج تحقیقات نشان داده است که مصرف کودهای سیلیکونی در شرایط تنش خشکی، باعث حفظ یکپارچگی غشاهای سلولی، افزایش قابل توجه فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی (SOD، CAT و POD)، کاهش اثر تنش اکسیداسیونی و بهبود انعطاف‌پذیری گیاه می‌شود (Mostofa *et al.*, 2021). گزارش شده است که سیلیکون باعث بهبود کارایی فتوسنتزی، افزایش سنتز و تجمع کربوهیدرات‌های محلول و بهبود تحمل به خشکی در گیاه می‌شود (Ulloa *et al.*, 2021). سیلیکون با بهبود جذب عناصر غذایی، کارایی مصرف آب و مسیرهای پیام‌رسانی در شرایط تنش، باعث افزایش سنتز پرولین در گیاه می‌شود. اثر همزمان تجمع سیلیکون و پرولین باعث تنظیم اسمزی و محافظت گیاه در برابر خسارت اکسیداسیونی و انعطاف‌پذیری گیاه شرایط تنش خشکی می‌شود (Wang *et al.*, 2021). نتایج تحقیقات نشان داده است که سیلیکون در بسیاری از موارد با تحریک رشد و افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، باعث حفاظت از گیاه در برابر تنش‌های محیطی می‌شود (Zhang *et al.*, 2017). همچنین گزارش شده است که سیلیکون باعث افزایش محتوای کلروفیل، هدایت روزنه‌ای، تولیدات فتوسنتزی و تحمل گیاهان در شرایط تنش می‌شود (Irfan *et al.*, 2023). سیلیکون از طریق بهبود فعالیت فتوسنتزی، افزایش فعالیت آنزیم‌ها، افزایش مواد محلول در آوندهای چوبی و حفاظت مکانیکی در برابر سمیت عناصر سنگین، باعث افزایش تحمل گیاه به تنش‌های محیطی می‌شود

(Matichenkov *et al.*, 2008).

در نتایج بسیاری از تحقیقات، اثر مثبت مصرف سیلیکون، به‌عنوان تعدیل کننده اثر کمبود آب، مورد تاکید قرار گرفته است، اما در بیشتر آن‌ها سیلیکون به‌صورت محلول‌پاشی مورد استفاده قرار گرفته است. به‌نظر می‌رسد که مصرف خاکی سیلیکون (به‌صورت کوددهی) روش مناسبی برای مصرف این عنصر باشد. این آزمایش با هدف ارزیابی اثر مصرف سیلیکون به‌صورت کودی و به‌عنوان کاهش‌دهنده اثر تنش خشکی و بهبود خصوصیات فیزیولوژیکی و عملکردی گیاه کینوا اجرا شد.

مواد و روش‌ها

این آزمایش در سال ۱۴۰۲ در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه پیام نور مرکز گندمان از توابع شهرستان بروجن استان چهارمحال و بختیاری اجرا شد. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و اطلاعات آب و هوایی محل اجرای آزمایش در جدول ۱ و شکل ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک محل اجرای آزمایش

Table 1. Chemical and physical properties of the soil at the experiment site

بافت خاک Soil texture	نیتروژن N (%)	فسفر P ($mg.kg^{-1}$)	پتاسیم K ($mg.kg^{-1}$)	کربن آلی O.C (%)	هدایت الکتریکی EC ($dS.m^{-1}$)	اسیدیته pH	سیلیکون Si ($mg.kg^{-1}$)
سیلتی لومی Silty loam	0.045	14.3	257	0.49	1.31	7.62	0.371

جدول ۲- اطلاعات ماهانه هواشناسی محل اجرای آزمایش (۱۴۰۲- ایستگاه سینوپتیک بروجن)

Table 2. Monthly meteorological information of the experiment site (2023 - Borujen synoptic station)

Month	ماه	دمای حداقل Min. temp. (°C)	دمای حداکثر Max. temp. (°C)	دمای میانگین Mean temp. (°C)	بارندگی Rainfall (mm)
Apr. 21 - May 21	اردیبهشت	-0.3	25.3	14.1	6.8
May 22 – Ju. 21	خرداد	7.3	32.5	19.7	0.4
Jun. 22 - Jul. 22	تیر	9.6	35.9	23.7	0
Jul. 23 – Aug. 22	مرداد	7.4	36.1	22.6	0
Aug. 23 – Se. 22	شهریور	7.5	33.6	21.5	0

آزمایش به‌صورت کرت‌های خرد شده در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا شد. تیمارهای آزمایشی شامل آبیاری در چهار سطح (۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی؛ به‌ترتیب تنش خشکی شدید، متوسط، ملایم و بدون تنش) به‌عنوان کرت‌های اصلی و کود حاوی سیلیکون در چهار سطح (صفر، یک، دو و سه لیتر در هکتار) به‌عنوان کرت‌های فرعی در نظر گرفته شدند. هر کرت آزمایشی شامل شش ردیف کاشت با فاصله ۳۰ سانتی‌متر و فاصله روی ردیف ۱۰ سانتی‌متر و تراکم ۳۳ بوته در مترمربع بود. بذرهای کینوا رقم تی‌تی‌کاکا در در اواخر اردیبهشت کاشته شده و بلافاصله پس از آن آبیاری به‌روش نواری انجام شد. برای اطمینان از سبز شدن مطلوب گیاهچه‌ها، آبیاری هفت روز بعد تکرار شد. در مرحله دو تا هشت برگی، بوته‌های اضافی تنک شدند. تنش خشکی ۳۵ روز پس از کاشت (اوایل گلدهی) اعمال شد. برای اعمال تنش خشکی، ظرفیت زراعی خاک تعیین شد. پس از تعیین رطوبت وزنی خاک در ظرفیت زراعی، حجم آب در تیمارهای آبیاری با استفاده از رابطه ۱ تعیین شد (Ghavamsaeidi Noghabi *et al.*, 2021).

$$V = ((FC - \theta m)\times Pb\times D_{root} \times A)/Ei \qquad \text{(رابطه ۱)}$$

V: حجم آب آبیاری بر حسب مترمکعب، FC: درصد رطوبت وزنی خاک در ظرفیت زراعی، θm: درصد رطوبت وزنی خاک قبل از آبیاری، Pb: وزن مخصوص ظاهری خاک (گرم بر سانتی‌مترمکعب) ، D_{root}: عمق توسعه ریشه بر حسب متر، A: مساحت کرت آبیاری شده بر حسب مترمربع، E_i: راندمان آبیاری می‌باشند (Ghavamsaeidi Noghabi et al., 2021). مقدار آب مصرفی در تیمارهای ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی به‌ترتیب ۱۰۹۸، ۱۶۴۷، ۲۱۹۶ و ۲۷۴۶ مترمکعب در هکتار بود. تنش خشکی ۳۰ روز پس از کاشت و مصرف کود سیلیکون در دو مرحله (۳۰ و ۶۰ روز پس از کاشت) همراه با آب آبیاری انجام شد. کود سیلیکون استفاده شده با نام تجاری Totale Silício® تولید شرکت Fertiláqua کشور برزیل بود. این کود حاوی ۷۵۰ گرم در لیتر دی‌اکسید سیلسیم (SiO_2) و ۴۵ گرم در لیتر اکسید پتاس (K_2O) با چگالی ۱/۲۰ گرم در لیتر به‌صورت مایع در سوسپانسیون است. پس از گلدهی (هشتم تیر)، از برگ‌های توسعه یافته انتهایی بوته‌های هر کرت برای ارزیابی‌های مورد نظر نمونه‌برداری شد. محتوای کلروفیل a، کلروفیل b و کاروتنوئیدهای نمونه‌ها با استفاده از روش آرنون (Arnon, 1967) اندازه گیری شدند. اندازه‌گیری فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی (کاتالاز، سوپراکسید دیسموتاز، پراکسیداز) با استفاده از روش سایرام و همکاران (Sairam *et al.*, 1998) انجام شد. اندازه‌گیری محتوای پرولین با استفاده از روش بیتس و همکاران (Bates *et al.*, 1973) انجام شد. اندازه‌گیری محتوای کربوهیدرات‌های محلول با استفاده از روش دابیوس و همکاران (Dubois *et al.*, 1956) انجام شد. برای اندازه‌گیری محتوای گلایسین بتائین از روش گریو و گراتان (Grieve and Grattan, 1983) استفاده شد. برای اندازه‌گیری محتوای آب نسبی (RWC) از روش گونش و همکاران (Gunes *et al.*, 2008) استفاده شد. برای اندازه‌گیری عملکرد دانه و عملکرد زیستی، پس از حذف یک متر از ابتدا و انتهای ردیف‌های کاشت هر کرت، بوته‌های دو ردیف میانی در تاریخ سوم شهریور برداشت و پس از خشکاندن در آون، وزن دانه‌ها و وزن خشک بوته‌ها اندازه‌گیری شدند.

تجزیه داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS 9.4 و مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون حداقل تفاوت معنی‌دار (LSD) در سطح احتمال پنج درصد انجام شد. برای رسم شکل‌ها از نرم‌افزار Excel استفاده شد.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر تیمارهای آبیاری و سیلیکون و برهمکنش آنها بر محتوای کلروفیل a، کلروفیل b، کاروتنوئیدها، نسبت کلروفیل a/b و کلروفیل کل در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بودند. نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که در هر چهار سطح آبیاری، با افزایش میزان مصرف سیلیکون، محتوای کلروفیل a افزایش یافت. در تیمار آبیاری ۱۰۰ درصد (بدون تنش)، محتوای کلروفیل a در تیمارهای دو و سه لیتر در هکتار سیلیکون تفاوتی نداشت، ولی نسبت به تیمار یک لیتر و بدون مصرف سیلیکون، به‌ترتیب ۷ و ۱۶ درصد بیشتر بود. در تیمار آبیاری ۴۰ درصد ظرفیت زراعی (تنش خشکی شدید)، تفاوت محتوای کلروفیل a برای بیشترین تا کمترین مقدار سیلیکون به‌ترتیب ۱۲، ۲۰ و ۱۰۳ درصد بود. محتوای کلروفیل a در تیمار آبیاری ۱۰۰ درصد در مقایسه با تیمار ۴۰ درصد ظرفیت زراعی برای سطوح صفر، یک، دو و سه لیتر در هکتار سیلیکون به‌ترتیب ۱۲۷، ۴۵، ۴۵ و ۲۹ درصد بیشتر بود. در سطوح مختلف آبیاری، با افزایش مصرف کود سیلیکون، محتوای کلروفیل a افزایش یافت، ولی در تیمار ۴۰ درصد ظرفیت زراعی، اثر مثبت کود سیلیکون بیشتر بود (جدول ۳).

نتایج نشان داد در هر چهار سطح آبیاری، با افزایش

میزان مصرف سیلیکون، محتوای کلروفیل b افزایش یافت. در تیمار آبیاری ۱۰۰ درصد، تفاوت محتوای کلروفیل b برای تیمار سه لیتر در هکتار نسبت به دو لیتر، یک لیتر و بدون مصرف سیلیکون به‌ترتیب ۱۶، ۳۶ و ۵۹ درصد بود. در تیمار آبیاری ۴۰ درصد ظرفیت زراعی، تفاوت کلروفیل b برای بیشترین تا کمترین مقدار سیلیکون به‌ترتیب ۴، ۲۳ و ۵۲ درصد بود. محتوای کلروفیل b در تیمار آبیاری ۱۰۰ درصد در مقایسه با تیمار ۴۰ درصد ظرفیت زراعی برای سطوح صفر، یک، دو و سه لیتر در هکتار سیلیکون به‌ترتیب ۷۰، ۶۲، ۶۰ و ۷۹ درصد بود. در سطوح مختلف آبیاری، با افزایش مصرف کود سیلیکون، محتوای کلروفیل b افزایش یافت، ولی در تیمار آبیاری ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی، اثر مثبت کود سیلیکون بیشتر بود (جدول ۳).

جدول ۳- مقایسه میانگین محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی کینوا در برهمکنش تیمارهای آبیاری و کود سیلیکون

Table 3. Mean comparisons photosynthetic pigments content of quinoa in interaction of irrigation and silicon fertilizer treatments

Irrigation	آبیاری	سیلیکون Silicon ($l.ha^{-1}$)	کلروفیل a Chl_a ($mg.g^{-1}$ FW)	کلروفیل b Chl_b ($mg.g^{-1}$ FW)	کاروتنوئیدها Carotenoids ($mg.g^{-1}$ FW)	کلروفیل a/b Chl. a/b	کلروفیل کل Total chl. ($mg.g^{-1}$ FW)
40% FC (severe drought stress)	۴۰ درصد ظرفیت زراعی (تنش شدید)	0	0.68g	0.118j	0.228i	5.76h	1.03h
		1	1.15f	0.145i	0.454h	7.93b	1.75g
		2	1.23e	0.173h	0.486g	7.11ef	1.89f
		3	1.38d	0.179g	0.494g	7.71cd	2.05f
60% FC (moderate drought stress)	۶۰ درصد ظرفیت زراعی (تنش متوسط)	0	1.15f	0.170h	0.485g	6.76g	1.81g
		1	1.37d	0.175g	0.567ef	7.83c	2.11e
		2	1.38d	0.187f	0.572d-f	7.38de	2.14d
		3	1.51c	0.191f	0.585cd	7.91c	2.29c
80% FC (mild drought stress)	۸۰ درصد ظرفیت زراعی (تنش ملایم)	0	1.51c	0.168h	0.455h	8.99b	2.13d
		1	1.67b	0.184g	0.572ef	9.08a	2.43c
		2	1.77a	0.213d	0.592c	8.31b	2.58b
		3	1.77a	0.228c	0.596c	7.76cd	2.59ab
100% FC (full irrigation)	۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی (آبیاری کامل- بدون تنش)	0	1.54c	0.201e	0.567f	7.66d	2.31c
		1	1.67b	0.235c	0.584c-e	7.11fg	2.49c
		2	1.78a	0.276b	0.657b	6.45h	2.71ab
		3	1.78a	0.320a	0.683a	5.56i	2.78a

در هر ستون میانگین‌هایی که دارای حروف مشترک هستند، بر اساس آزمون حداقل تفاوت معنی‌دار (LSD) در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌داری ندارند

Means in each column followed by similar letter(s) are not significantly different at 5% probability level, using LSD test

نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که در هر چهار سطح آبیاری، با افزایش میزان مصرف سیلیکون، محتوای کاروتنوئیدها افزایش یافت. در تیمار آبیاری ۱۰۰ درصد، تفاوت محتوای کاروتنوئیدها برای تیمار سه لیتر در هکتار نسبت به دو لیتر، یک لیتر و بدون مصرف سیلیکون به‌ترتیب ۴، ۱۷ و ۲۱ درصد بود. در تیمار آبیاری ۴۰ درصد ظرفیت زراعی، تفاوت محتوای کاروتنوئیدها برای بیشترین تا کمترین میزان سیلیکون به‌ترتیب ۲، ۹ و ۱۱۷ درصد بود. تفاوت محتوای کاروتنوئیدها در تیمار آبیاری ۱۰۰ درصد در مقایسه با تیمار ۴۰ درصد ظرفیت زراعی برای سطوح صفر، یک، دو و سه لیتر در هکتار سیلیکون به‌ترتیب ۱۴۹، ۲۹، ۳۵ و ۳۸ درصد بیشتر بود. در سطوح مختلف آبیاری، با افزایش مصرف کود سیلیکون، بر محتوای کاروتنوئیدها افزوده شد (جدول ۳).

نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که در هر چهار سطح آبیاری، اثر سطوح سیلیکون برای نسبت کلروفیل a/b متفاوت بود. در تیمارهای آبیاری ۴۰، ۶۰ و ۸۰

درصد ظرفیت زراعی، بیشترین نسبت کلروفیل a/b در تیمار یک لیتر در هکتار سیلیکون بدست آمد و در تیمار ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی، تیمار بدون مصرف سیلیکون دارای بیشترین مقدار بود. بیشترین مقدار نسبت کلروفیل a/b (۹/۰۸) در تیمار ۸۰ درصد ظرفیت زراعی و مصرف یک لیتر در هکتار سیلیکون و کمترین مقدار آن (۵/۵۶) در تیمار ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی و مصرف سه لیتر در هکتار سیلیکون بدست آمد که تفاوت آنها ۶۳ درصد بود (جدول ۲). بر اساس نتایج مقایسه میانگین‌ها در سطوح مختلف آبیاری، با افزایش مصرف کود سیلیکون، بر میزان کلروفیل کل افزوده شد، ولی در تیمار ۴۰ درصد ظرفیت زراعی، اثر مثبت سیلیکون بیشتر بود (جدول ۳).

تیمارهای آبیاری و عنصر سیلیکون (Si) اثر قابل توجهی بر محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی می‌گذارند. در شرایط بدون تنش، سیلیکون نقش مفیدی در افزایش کارایی فتوسنتزی و پایداری کلروفیل در گیاهان دارد. این عنصر برای تقویت غشاهای سلولی، افزایش تحمل گیاه در برابر تنش‌های محیطی و بهبود جذب عناصر غذایی مفید است (Teixeira *et al.*, 2022). وقوع تنش خشکی باعث تخریب رنگیزه‌های فتوسنتزی و کاهش ظرفیت فتوسنتزی و اختلال در رشد گیاه می‌شود. تنش خشکی اغلب باعث وقوع تنش اکسیداتیو و آسیب به کلروفیل و کاروتنوئیدها و اختلال در دستگاه فتوسنتزی گیاه می‌شود. مصرف سیلیکون اثرات نامطلوب تنش خشکی بر رنگیزه‌های فتوسنتزی گیاه را کاهش می‌دهد و در شرایط محدودیت آب به حفظ سطوح کلروفیل a و b و کاروتنوئیدها کمک می‌کند (Maghsoudi *et al.*, 2016). در شرایط تنش خشکی، در گیاهان تیمار شده با سیلیکون محتوای کلروفیل و کاروتنوئیدها در مقایسه با گیاهان تیمار نشده بیشتر است. حفظ رنگیزه‌های فتوسنتزی باعث جذب بهتر نور، انتقال انرژی و عملکرد کلی فتوسنتزی در شرایط کمبود آب می‌شود (Mostofa *et al.*, 2021). اثر محافظتی سیلیکون در شرایط کمبود آب بارزتر است. سیلیکون با افزایش فعالیت آنزیم‌هایی مانند سوپراکسید دیسموتاز و کاتالاز که نقش مهمی در سم‌زدایی گونه‌های فعال اکسیژن دارند، از تخریب کلروفیل محافظت می‌کند. سیلیکون باعث تسهیل جذب آب توسط ریشه شده و با بهبود هدایت روزنه‌ای و حفظ آماس سلولی، از دست دادن آب در اثر تعرق را کاهش می‌دهد. اثر دوگانه سیلیکون از طریق فرایندهای بیوشیمیایی و فیزیولوژیکی، نشان دهنده اهمیت آن در حفظ ثبات رنگیزه‌های فتوسنتزی فتوسنتزی در شرایط تنش خشکی است (Saja-Garbarz *et al.*, 2024). نتایج یک آزمایش نشان داد که تنش خشکی باعث کاهش محتوای رنگیزه‌های کلروفیل و کاروتنوئیدها شده و تیمار گیاه با سیلیکون آثار منفی تنش خشکی را کاهش داده و باعث افزایش محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی می‌شود (Bagheri *et al.*, 2020).

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر تیمارهای آبیاری و سیلیکون و برهمکنش آنها بر فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و پراکسیداز و اثر تیمارهای آبیاری و برهمکنش آبیاری و سیلیکون بر فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بودند. نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که در هر چهار سطح آبیاری، با افزایش مصرف سیلیکون بر فعالیت آنزیم کاتالاز افزوده شد. در تیمار آبیاری ۱۰۰ درصد، تفاوت فعالیت آنزیم کاتالاز برای تیمار سه لیتر در هکتار سیلیکون نسبت به دو لیتر، یک لیتر و بدون مصرف سیلیکون به‌ترتیب ۱۱، ۲۸ و ۵۷ درصد بود. در تیمار آبیاری ۴۰ درصد ظرفیت زراعی، تفاوت فعالیت آنزیم کاتالاز برای بیشترین تا کمترین میزان سیلیکون به‌ترتیب ۳۱، ۶۲ و ۲۶۴ درصد بود. تفاوت فعالیت آنزیم کاتالاز در دو سطح آبیاری ۱۰۰ درصد و ۴۰ درصد ظرفیت زراعی برای سطوح صفر، یک، دو و سه لیتر در هکتار سیلیکون به‌ترتیب ۷/۳، ۳/۵، ۳/۲ و ۲/۶ برابر بیشتر بود. در این رابطه می‌توان اظهار کرد که در

سطوح مختلف آبیاری، با افزایش مصرف کود سیلیکون، بر میزان فعالیت آنزیم کاتالاز افزوده شد، ولی در تیمار ۴۰ درصد ظرفیت زراعی، اثرات مثبت سیلیکون بیشتر بود (جدول ۴).

جدول ۴- مقایسه میانگین فعالیت آنزیم‌های کاتالاز، سوپراکسید دیسموتاز و پراکسیداز کینوا در برهمکنش تیمارهای آبیاری و کود سیلیکون

Table 4. Mean comparisons of catalase, superoxide dismutase, and peroxidase activity of quinoa in interaction of irrigation and silicon fertilizer treatments

Irrigation	آبیاری	سیلیکون Silicon (l.ha^{-1})	کاتالاز Catalase	سوپراکسید دیسموتاز Superoxide dismutase	پراکسیداز Peroxidase
			(µmol.min^{-1}.mg^{-1} protein)		
40% FC (severe drought stress)	۴۰ درصد ظرفیت زراعی (تنش شدید)	0	0.294f	4.79g	2.97g
		1	0.660f	4.93g	5.47fg
		2	0.818f	6.17fg	5.47fg
		3	1.070ef	7.90f	8.20e
60% FC (moderate drought stress)	۶۰ درصد ظرفیت زراعی (تنش متوسط)	0	0.818f	4.93g	5.88f
		1	1.070ef	5.47fg	8.96e
		2	2.140d	6.17fg	10.40e
		3	2.99bc	8.40f	23.50b
80% FC (mild drought stress)	۸۰ درصد ظرفیت زراعی (تنش ملایم)	0	1.810de	7.95f	10.40e
		1	2.440cd	12.10e	17.10cd
		2	3.070a-c	18.80bc	19.20c
		3	3.130a-c	28.70a	23.80b
100% FC (full irrigation)	۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی (آبیاری کامل- بدون تنش)	0	2.440cd	12.10e	16.20d
		1	2.990bc	17.80cd	19.20c
		2	3.470ab	21.10b	24.60b
		3	3.840a	28.70a	29.40a

در هر ستون میانگین‌هایی که دارای حروف مشترک هستند، بر اساس آزمون حداقل تفاوت معنی‌دار (LSD) در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌داری ندارند

Means in each column followed by similar letter(s) are not significantly different at 5% probability level, using LSD test

نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد در هر چهار سطح آبیاری، با افزایش مصرف سیلیکون بر فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز افزوده شد. در تیمار آبیاری ۱۰۰ درصد، تفاوت فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز برای تیمار سه لیتر در هکتار نسبت به دو لیتر، یک لیتر و شاهد بدون مصرف سیلیکون به‌ترتیب ۳۶، ۶۱ و ۱۳۷ درصد بود. در تیمار آبیاری ۴۰ درصد ظرفیت زراعی، تفاوت میزان فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز برای بیشترین تا کمترین میزان سیلیکون به‌ترتیب ۲۸، ۶۰ و ۶۵ درصد بود. تفاوت فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز در دو سطح آبیاری ۱۰۰ درصد و ۴۰ درصد ظرفیت زراعی برای سطوح صفر، یک، دو و سه لیتر در هکتار سیلیکون به‌ترتیب ۱/۵، ۲/۶، ۲/۴ و ۲/۶ برابر بیشتر بود (جدول ۴).

نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد در هر چهار سطح آبیاری، با افزایش مصرف سیلیکون بر فعالیت آنزیم پراکسیداز افزوده شد. در تیمار آبیاری ۱۰۰ درصد، تفاوت فعالیت آنزیم پراکسیداز برای تیمار سه لیتر در هکتار نسبت به دو لیتر، یک لیتر و شاهد بدون مصرف سیلیکون به‌ترتیب ۲۰، ۵۳ و ۸۲ درصد بود. در تیمار آبیاری ۴۰ درصد ظرفیت زراعی، تفاوت میزان فعالیت آنزیم پراکسیداز برای بیشترین تا کمترین میزان سیلیکون به‌ترتیب ۵۰، ۵۰ و ۱۷۶ درصد بود. تفاوت فعالیت آنزیم پراکسیداز در دو سطح آبیاری ۱۰۰ درصد و ۴۰ درصد ظرفیت زراعی برای سطوح صفر، یک، دو و سه لیتر در هکتار سیلیکون به‌ترتیب ۴/۵،

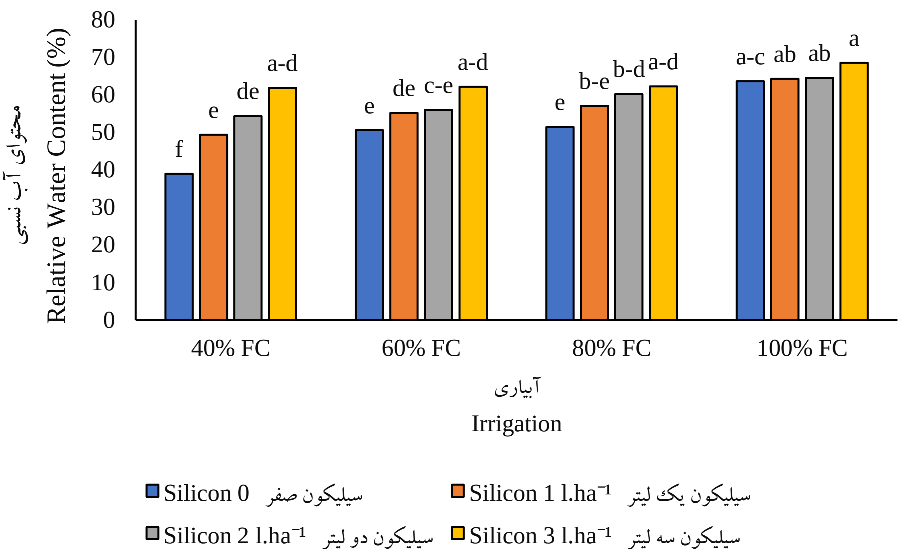
۲/۵، ۳/۵ و ۲/۶ برابر بیشتر بود. بر این اساس می‌توان اظهار کرد که در سطوح مختلف آبیاری، با افزایش مصرف کود سیلیکون، بر فعالیت آنزیم پراکسیداز افزوده شد، ولی در تیمار ۴۰ درصد ظرفیت زراعی، اثرات مثبت سیلیکون بیشتر بود (جدول ۴).

گزارش شده است که برهمکنش تنش خشکی و سیلیکون بر فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی کاتالاز، آسکوربات پراکسیداز و پراکسیداز در گیاهان اثر قابل توجهی دارد. در شرایط تنش خشکی، گیاهان اغلب در اثر تولید بیش از حد گونه‌های فعال اکسیژن مانند پراکسید هیدروژن، دچار تنش اکسیداتیو می‌شوند که باعث آسیب به اجزای سلولی و اختلال در عملکرد و رشد گیاه می‌شود (Maruta and Ishikawa, 2018). کاتالاز، آسکوربات پراکسیداز و پراکسیداز آنزیم‌های حیاتی در سازوکارهای دفاعی گیاه در برابر تنش اکسیداتیو هستند و نقش اساسی در سم‌زدایی گونه‌های فعال اکسیژن دارند (Caverzan *et al.*, 2012). کاتالاز با کاتالیز تجزیه پراکسید هیدروژن به آب و اکسیژن باعث کاهش خسارت تنش اکسیداتیو می‌شود. آسکوربات پراکسیداز از آسکوربات به عنوان سوبسترا برای تبدیل پراکسید هیدروژن به آب استفاده می‌کند، در حالی که پراکسیداز به احیای پراکسید هیدروژن و پراکسیدهای آلی کمک می‌کند (Maruta and Ishikawa, 2018). گزارش شده است که سیلیکون باعث افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی در شرایط تنش خشکی می‌شود. سیلیکون ظرفیت کلی آنتی‌اکسیدانی گیاه را افزایش داده و باعث پاسخ قوی‌تر گیاه به تنش اکسیداتیو می‌شود (Teixeira *et al.*, 2022). نقش کمکی سیلیکون در افزایش فعالیت کاتالاز باعث تجزیه کارآمدتر پراکسید هیدروژن و کاهش اثرات مضر آن در گیاه می‌شود. افزایش فعالیت آسکوربات پراکسیداز به حفظ تعادل آسکوربات و سایر آنتی‌اکسیدان‌ها کمک کرده و باعث سم زدایی مداوم گونه‌های فعال اکسیژن می‌شود. فعالیت آنزیم پراکسیداز نیز توسط سیلیکون تنظیم شده و باعث کاهش تنش اکسیداتیو از طریق سم‌زدایی پراکسید هیدروژن و پراکسیدهای آلی می‌شود (Teixeira *et al.*, 2022). اثر کمکی سیلیکون بر فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، باعث کاهش خسارت تنش اکسیداتیو در گیاهان در شرایط خشکی می‌شود. این تعامل علاوه بر کاهش آسیب سلولی، باعث افزایش رشد و بهره‌وری بهتر گیاه در دوره‌های کمبود آب می‌شود (Kim *et al.*, 2017). بنابراین افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی توسط سیلیکون، نقش مهمی در انعطاف‌پذیری گیاهان در برابر تنش خشکی داشته و باعث حفظ عملکردهای فیزیولوژیکی و ادامه رشد گیاه در شرایط نامطلوب می‌شود. نتایج یک آزمایش روی چمن پوا نشان داد که فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی در مواجه شدن گیاه با تنش خشکی افزایش یافت (Kim *et al.*, 2017). همچنین گزارش شده است مصرف کود سیلیکون در شرایط تنش خشکی باعث افزایش معنی‌دار فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی در ارقام گندم می‌شود (Amjad *et al.*, 2011).

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر تیمارهای آبیاری و سیلیکون و برهمکنش آنها بر محتوای آب نسبی برگ در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. با توجه به نتایج مقایسه میانگین‌ها، در هر چهار سطح آبیاری، با افزایش مصرف سیلیکون بر محتوای آب نسبی برگ افزوده شد. در تیمار آبیاری ۱۰۰ درصد، تفاوت محتوای آب نسبی برگ برای تیمار سه لیتر در هکتار نسبت به دو لیتر، یک لیتر و شاهد بدون مصرف سیلیکون به‌ترتیب ۶، ۷ و ۸ درصد بود. در تیمار آبیاری ۴۰ درصد ظرفیت زراعی، تفاوت محتوای آب نسبی برگ برای بیشترین تا کمترین میزان سیلیکون به‌ترتیب ۱۴، ۲۵ و ۵۹ درصد بود. تفاوت محتوای آب نسبی آب برگ در دو سطح آبیاری ۱۰۰ درصد و ۴۰ درصد ظرفیت زراعی برای مقادیر صفر، یک، دو و سه لیتر در

هکتار سیلیکون به‌ترتیب ۶۳، ۳۰، ۱۹ و ۱۱ درصد بود. در سطوح مختلف آبیاری، با افزایش مصرف کود سیلیکون بر محتوای آب نسبی برگ افزوده شد، ولی در تیمار ۴۰ درصد ظرفیت زراعی، اثرات مثبت سیلیکون بیشتر بود (شکل ۱).

تنش خشکی باعث کاهش محتوای آب نسبی برگ می‌شود که باعث کاهش فشار آماس، پژمردگی و اختلال در عملکردهای فیزیولوژیکی گیاه مانند فتوسنتز و انتقال مواد غذایی می‌شود (Seleiman *et al.*, 2021). اثر مفید استفاده از سیلیکون برای کاهش اثرات منفی تنش خشکی بر محتوای آب نسبی گزارش شده است. سیلیکون با تشکیل یک لایه محافظ در اپیدرم برگ، کاهش میزان تعرق و بهبود کارایی مصرف آب، باعث افزایش توانایی گیاه در حفظ آب می‌شود. سیلیکون باعث تقویت دیواره‌های سلولی و حفظ ساختار و عملکرد سلول در شرایط کم آب می‌شود (Irfan *et al.*, 2023). گیاهان در شرایط تنش خشکی و در حضور سیلیکون، محتوای آب نسبی بالاتری را در مقایسه با گیاهان بدون تیمار سیلیکون نشان می‌دهند. تعامل بین تنش خشکی و سیلیکون باعث بهبود نگهداری آب در برگ‌ها و تداوم فعالیت‌های متابولیکی در گیاه می‌شود (Seleiman *et al.*, 2021). گیاهانی که در شرایط خشکی با سیلیکون تیمار شده‌اند، پژمردگی کمتر، رشد بهتر و انعطاف‌پذیری بالاتری نسبت به تنش کمبود آب دارند.



شکل ۱- مقایسه میانگین محتوای آب نسبی برگ کینوا در برهمکنش تیمارهای آبیاری و کود سیلیکون

Fig. 1. Mean comparison of Relative Water Content of quinoa leaf in interaction of irrigation and silicon fertilizer treatments

تجزیه واریانس صفات نشان داد اثر تیمارهای آبیاری و سیلیکون بر محتوای پرولین برگ در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود، ولی برهمکنش آنها اثر معنی‌داری نداشت. با افزایش شدت تنش بر میزان پرولین افزوده شد. هرچند تیمارهای آبیاری ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی از نظر آماری تفاوت معنی‌داری نداشتند، ولی بیشترین (۱/۵۶ میکرومول بر گرم وزن تر) و کمترین (۰/۷۶ میکرومول بر گرم وزن تر) میزان پرولین به‌ترتیب در تیمارهای ۴۰ و ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی مشاهده شدند. با افزایش مصرف سیلیکون بر میزان پرولین برگ افزوده شد. تفاوت بیشترین و کمترین میزان پرولین برای سطوح مختلف

سیلیکون ۴۱ درصد بود (جدول ۵). تجمع پرولین در شرایط تنش خشکی، یک واکنش رایج در بسیاری از گونه‌های گیاهی است. پرولین به عنوان یک محافظ اسمزی عمل کرده و با متعادل کردن فشار اسمزی به حفظ آماس سلولی کمک می‌کند. پرولین با حذف گونه‌های فعال اکسیژن باعث کاهش خسارت تنش اکسیداتیو شده و در نتیجه از ساختارهای سلولی در برابر آسیب اکسیداتیو محافظت می‌کند (Zhang *et al.*, 2017). گزارش شده است افزایش محتوای پرولین در طول تنش خشکی یک سازوکار محافظتی است که توانایی گیاه را برای تحمل و بازیابی از شرایط کمبود آب افزایش می‌دهد. مصرف کود سیلیکون، به ویژه در شرایط تنش خشکی باعث تجمع پرولین در گیاه می‌شود. مصرف سیلیکون باعث افزایش سازوکارهای پاسخ به تنش در گیاه شده و باعث افزایش سنتز پرولین می‌شود. این افزایش تا حدی به دلیل نقش سیلیکون در بیان ژن‌های مرتبط با تنش و فعالیت‌های آنزیمی درگیر در بیوسنتز پرولین است (Wang *et al.*, 2021). نتایج مربوط به برهمکنش تنش خشکی و کود سیلیکون روی گیاه گل گاو زبان نشان داد که افزایش شدت تنش خشکی و مصرف سیلیکون، باعث افزایش محتوای پرولین گیاه شد (Bagheri *et al.*, 2020).

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر تیمارهای آبیاری و سیلیکون بر محتوای کربوهیدرات‌های محلول برگ در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود، ولی برهمکنش آنها اثر معنی‌داری نداشت. همانند پرولین، با افزایش شدت تنش خشکی بر میزان کربوهیدرات‌های محلول افزوده شد. تفاوت بیشترین (۲۰/۶۵ میلی‌گرم در گرم وزن تر) و کمترین (۱۳/۵۳ میلی‌گرم در گرم وزن تر) مقدار کربوهیدرات‌های محلول به‌ترتیب در تیمارهای ۴۰ و ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی مشاهده شدند. با افزایش میزان مصرف سیلیکون بر محتوای کربوهیدرات‌های محلول برگ افزوده شد. بیشترین (۲۰ میلی‌گرم در گرم وزن تر) و کمترین (۱۳ میلی‌گرم در گرم وزن تر) میزان کربوهیدرات‌های محلول به‌ترتیب در سیلیکون سه لیتر در هکتار و شاهد بدون مصرف سیلیکون بدست آمد و تفاوت آنها ۵۴ درصد بود (جدول ۵).

تنش خشکی باعث ایجاد تغییر در متابولیسم کربوهیدرات‌ها و تجمع قندهای محلول مانند گلوکز، فروکتوز و ساکارز می‌شود. این کربوهیدرات‌ها با حفظ آماس سلولی و تعادل اسمزی به عنوان محافظ اسمزی عمل می‌کنند (Huang *et al.*, 2023). گزارش شده است که تجمع قندهای محلول در مسیرهای پیام‌رسانی که پاسخ‌های تنش را تنظیم می‌کنند، نقش داشته و به گیاه کمک می‌کنند تا با شرایط خشکی سازگار شود (Gaur *et al.*, 2021). سیلیکون نیز بر متابولیسم کربوهیدرات‌ها در گیاهان تأثیر می‌گذارد. در شرایط بدون تنش و تنش، سیلیکون تجمع قندهای محلول مانند گلوکز، فروکتوز و ساکارز را افزایش می‌دهد. این کار از طریق چندین سازوکار انجام می‌شود که می‌توان به تثبیت ساختارهای کلروپلاست‌ها و افزایش فعالیت آنزیم‌های فتوسنتزی، بهبود کارایی فتوسنتز و افزایش تولید کربوهیدرات‌ها اشاره کرد. سیلیکون با کمک به سنتز کربوهیدرات‌های ساختاری مانند سلولز و همی‌سلولز، دیواره‌های سلولی را تقویت می‌کند (Ulloa *et al.*, 2021). نتایج یک آزمایش روی گیاه گل گاو زبان (Bagheri *et al.*, 2020) نشان داد که با افزایش شدت تنش خشکی، محتوای کربوهیدرات‌های محلول افزایش یافت. در ارزیابی اثر مصرف سیلیکون بر گندم نشان داده شد که مصرف سیلیکون در شرایط تنش خشکی باعث افزایش محتوای کربوهیدرات‌ها می‌شود (Mukhtar *et al.*, 2012).

تجزیه واریانس صفات نشان داد اثر تیمارهای آبیاری بر محتوای گلایسین بتائین در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. نتایج نشان داد که با افزایش شدت تنش بر میزان گلایسین بتائین افزوده شد. بیشترین و

جدول ۵- مقایسه میانگین محتوای پرولین و کربوهیدرات‌های محلول کینوا در تیمارهای آبیاری و کود سیلیکون

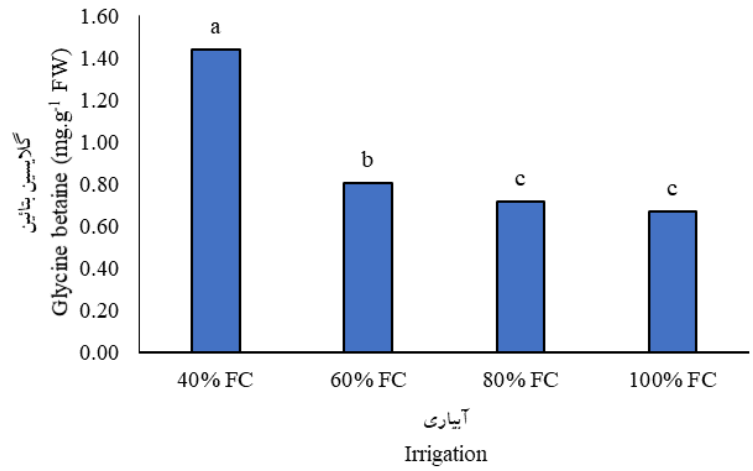
Table 5. Mean comparisons of proline and soluble carbohydrates content of quinoa in irrigation and silicon fertilizer treatments

Irrigation	آبیاری	پرولین Proline (µmol.g^{-1} FW)	کربوهیدرات‌های محلول Soluble carbohydrates (mg.g^{-1} FW)
40% FC (severe drought stress)	۴۰ درصد ظرفیت زراعی (تنش شدید)	1.56a	20.7a
60% FC (moderate drought stress)	۶۰ درصد ظرفیت زراعی (تنش متوسط)	0.85b	16.8b
80% FC (mild drought stress)	۸۰ درصد ظرفیت زراعی (تنش ملایم)	0.81b	16.5b
100 % FC (full irrigation)	۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی (آبیاری کامل- بدون تنش)	0.76b	13.5c
Silicon (l.ha^{-1})	سیلیکون		
0	صفر	0.796c	13.0c
1	یک	1.03b	16.8b
2	دو	1.04ab	17.7ab
3	سه	1.12a	20.0a

در هر ستون میانگین‌هایی که دارای حروف مشترک هستند، بر اساس آزمون حداقل تفاوت معنی‌دار (LSD) در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌داری ندارند

Means in each column followed by similar letter(s) are not significantly different at 5% probability level, using LSD test

کمترین مقدار گلایسین بتائین به‌ترتیب در تیمار ۴۰ درصد ظرفیت زراعی (۱/۴۴ میلی‌گرم در گرم وزن تر) و ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی (۰/۶۷ میلی‌گرم در گرم وزن تر) بدست آمد و تفاوت آنها ۱۱۵ درصد بود (شکل ۲). گلایسین بتائین یکی از محافظ‌های اسمزی است که در شرایط تنش خشکی در گیاهان تجمع می‌یابد. افزایش محتوای گلایسین بتائین به تثبیت ساختار پروتئین‌ها و غشای سلولی کمک کرده و از آنها در برابر آسیب‌های ناشی از کم آبی محافظت می‌کند. گلایسین بتائین به حفظ تعادل اسمزی درون سلول‌ها کمک می‌کند که برای حفظ آب و حفظ عملکرد سلولی در طول دوره تنش بسیار مهم است. گلایسین بتائین فعالیت آنزیم‌های درگیر در پاسخ‌های گیاه به تنش و فرآیندهای متابولیک را افزایش داده و باعث افزایش توانایی گیاه برای مقابله با کمبود آب می‌شود (Ibrahim *et al.*, 2023). طالع احمد و حداد

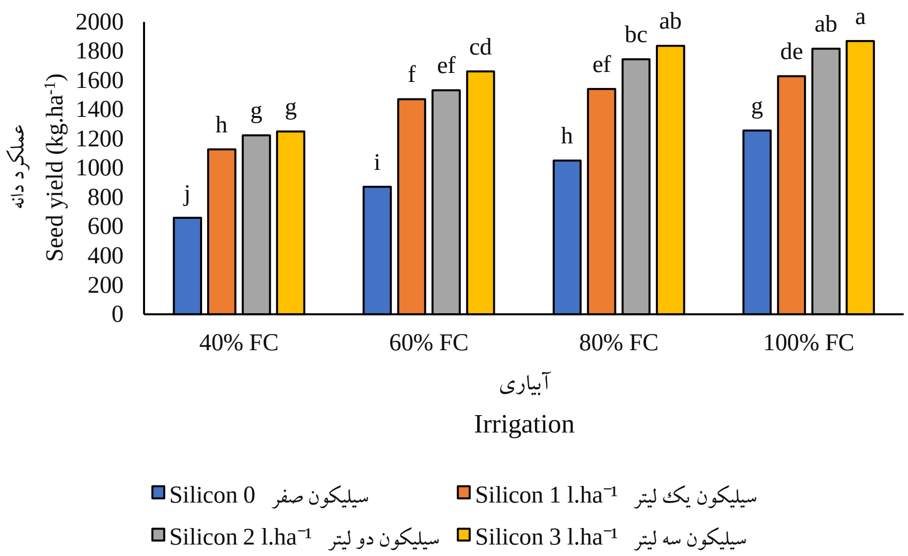


شکل ۲- مقایسه میانگین محتوای گلایسین بتائین کینوا در تیمارهای آبیاری

Fig. 2. Main comparison of glycine betaine content of quinoa in irrigation treatments

(Tale-Ahmad and Haddad, 2011) گزارش دادند که محتوای گلایسین‌بتائین در گیاهان در شرایط تنش خشکی از گیاهان شاهد بیشتر است و مصرف سیلیکون اثر منفی تنش خشکی را که باعث انباشت گلایسین‌بتائین می‌شود، بهبود بخشیده و تا حدی باعث تحمل گیاه به تنش خشکی می‌شود.

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر تیمارهای آبیاری و سیلیکون و برهمکنش آنها بر عملکرد دانه و زیست‌توده در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بودند. نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که در هر چهار سطح آبیاری، با افزایش مصرف سیلیکون بر عملکرد دانه افزوده شد. در تیمار آبیاری ۱۰۰ درصد، تفاوت عملکرد دانه برای تیمار سه لیتر در هکتار نسبت به دو لیتر، یک لیتر و شاهد بدون مصرف سیلیکون به‌ترتیب ۳، ۱۵ و ۴۹ درصد بود. در تیمار آبیاری ۴۰ درصد ظرفیت زراعی، تفاوت عملکرد دانه برای بیشترین تا کمترین مقدار سیلیکون به‌ترتیب ۲، ۱۱ و ۸۹ درصد بود. تفاوت عملکرد دانه در دو سطح آبیاری ۱۰۰ درصد و ۴۰ درصد ظرفیت زراعی برای سطوح صفر، یک، دو و سه لیتر در هکتار سیلیکون به‌ترتیب ۴۹، ۴۸، ۴۵ و ۹۰ درصد بود. بر این اساس می‌توان اظهار کرد که در سطوح مختلف آبیاری، با افزایش مصرف کود سیلیکون، بر میزان عملکرد دانه افزوده شد. در تیمار ۱۰۰ درصد نسبت به ۴۰ درصد ظرفیت زراعی، در تیمار سیلیکون سه لیتر نسبت به دو لیتر و یک لیتر، از نظر عملکرد دانه تفاوتی وجود نداشت، ولی در تیمار شاهد بدون مصرف سیلیکون تفاوت معنی‌دار بود (شکل ۳). در شرایط تنش خشکی، مولکول‌های اسمولیتی مانند پرولین، کربوهیدرات‌ها و گلایسین بتائین در گیاه تولید و انباشته شده و به گیاه در تحمل تنش و اجتناب از کاهش شدید عملکرد عملکرد کمک می‌کنند. کواچ و همکاران (Kovács *et al.*, 2022) گزارش دادند که کود سیلیکون نقش مهمی در افزایش تولید گیاهانی مانند جو، گندم، ذرت و نیشکر دارد. مصرف سیلیکون باعث پاسخ مثبت گیاه به‌صورت افزایش رشد، افزایش زیست‌توده، اجزای عملکرد و عملکرد می‌شود (Mukhtar *et al.*, 2012). هاتوری و همکاران (Hattori et al., 2005) گزارش کردند که سیلیکون با به حداقل رساندن سرعت تعرق و افزایش ظرفیت نگهداری آب در برگ که باعث افزایش سرعت جذب دی‌اکسید کربن می‌شود،

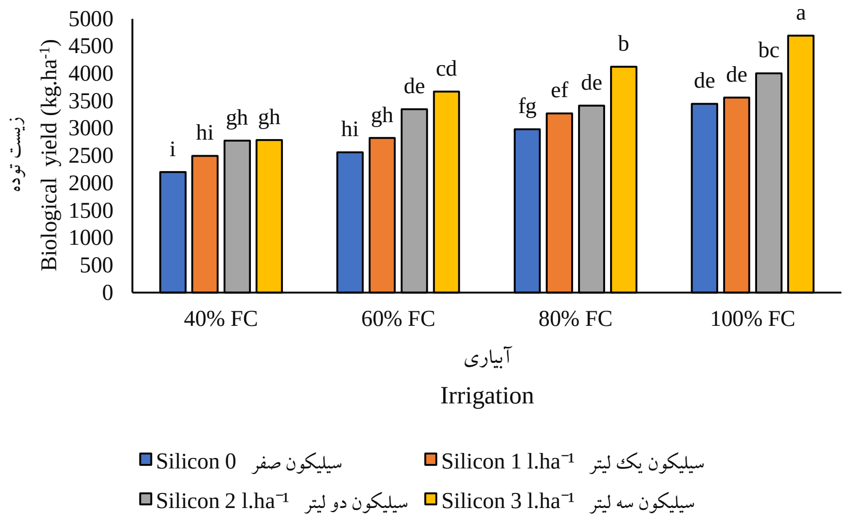


شکل ۳- مقایسه میانگین عملکرد دانه کینوا در برهمکنش تیمارهای آبیاری و کود سیلیکون

Fig. 3. Mean comparison of seed yield of quinoa in interaction of irrigation and silicon fertilizer treatments

باعث افزایش تحمل گیاه سورگوم به خشکی می‌شود. ثابت شده است که مصرف سیلیکون با افزایش دوام سطح برگ‌ها باعث افزایش رشد گیاه و تولید محصول آن می‌شود (Kovács *et al.*, 2022). بوچارنیکووا و همکاران (Bocharnikova *et al.*, 2010) با ارزیابی کارایی انواع کودهای سیلیکونی (دی‌اکسید سیلیکون آمورف، سیلیکات کلسیم و محلول اسید مونوسیلیسیک با غلظت ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر سیلیکون) در برنج، گندم، ذرت و جو گزارش دادند که انواع کودهای سیلیکونی باعث افزایش قابل ملاحظه عملکرد آنها شد.

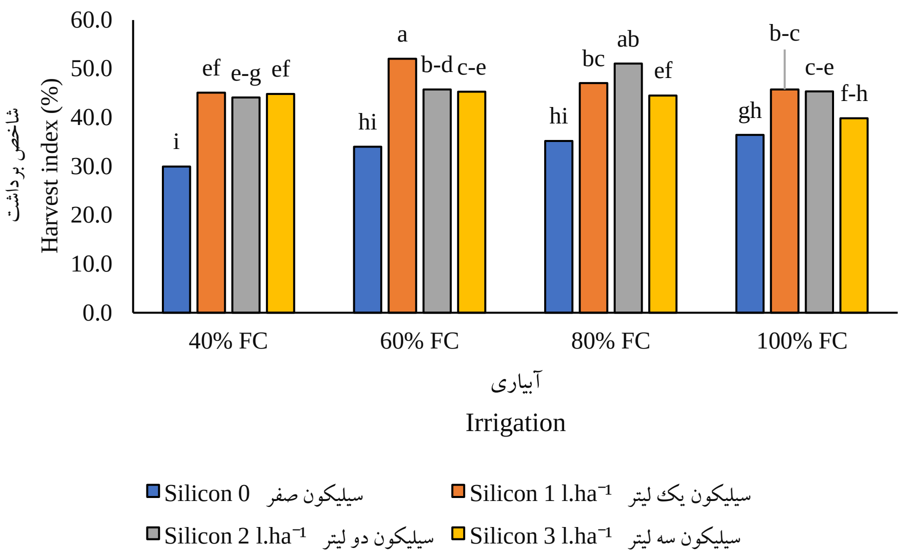
نتایج نشان داد که در هر چهار سطح آبیاری، با افزایش مصرف سیلیکون بر عملکرد زیست‌توده افزوده شد. در تیمار آبیاری ۱۰۰ درصد، تفاوت عملکرد زیست‌توده برای تیمار سه لیتر در هکتار نسبت به دو لیتر، یک لیتر و شاهد بدون مصرف سیلیکون به‌ترتیب ۱۷، ۳۲ و ۳۶ درصد بود. در تیمار آبیاری ۴۰ درصد ظرفیت زراعی، تفاوت عملکرد زیست‌توده برای بیشترین تا کمترین مقدار سیلیکون به‌ترتیب ۰/۴، ۱۲ و ۲۷ درصد بود. تفاوت عملکرد زیست‌توده در دو سطح آبیاری ۱۰۰ درصد و ۴۰ درصد ظرفیت زراعی برای سطوح صفر، یک، دو و سه لیتر در هکتار سیلیکون به‌ترتیب ۶۸، ۴۴، ۴۳ و ۵۷ درصد بود. بر این اساس می‌توان اظهار کرد که در سطوح مختلف آبیاری، با افزایش سطوح کود سیلیکون، بر میزان عملکرد زیست‌توده افزوده شد، ولی در تیمار ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی، اثرات مثبت سیلیکون بیشتر بود (شکل ۴). گزارش شده است که در شرایط تنش خشکی، مصرف سیلیکون باعث افزایش رشد و تولید ماده خشک و عملکرد دانه، در سورگوم شد (Ahmed *et al.*, 2011). شن و همکاران (Shen *et al.*, 2010) گزارش دادند که مصرف سیلیکون نقش مهمی در افزایش ماده خشک گیاهان سورگوم و سویا در شرایط تنش خشکی ایفا می‌کند. بوچارنیکووا و همکاران (Bocharnikova *et al.*, 2010) با ارزیابی کارایی انواع کودهای سیلیکونی در برنج، گندم، ذرت و جو گزارش دادند که تولید زیست‌توده جو در اثر استفاده از ترکیبات حاوی سیلیکون ۱۰ تا ۵۳ درصد افزایش یافته و گیاهان تحمل بیشتری به تنش خشکی داشتند. نتایج آزمایش کوواکس و همکاران (Kovács *et al.*, 2022) نشان داد که مصرف سیلیکون در شرایط تنش خشکی باعث افزایش عملکرد ذرت شد.



شکل ۴- مقایسه میانگین عملکرد زیست‌توده کینوا در برهمکنش تیمارهای آبیاری و کود سیلیکون

Fig. 4. Mean comparison of biological yield of quinoa in interaction of irrigation and silicon fertilizer treatments

بر اساس نتایج مقایسه میانگین‌ها، در هر چهار سطح آبیاری، سطوح یک، دو و سه لیتر در هکتار سیلیکون نسبت به تیمار بدون مصرف سیلیکون دارای شاخص برداشت بیشتری بودند. بیشترین مقدار شاخص برداشت (۵۲/۱ درصد) در تیمار آبیاری ۶۰ درصد ظرفیت زراعی و کود سیلیکون یک لیتر در هکتار و کمترین مقدار شاخص برداشت (۳۰ درصد) در تیمار ۴۰ درصد ظرفیت زراعی و تیمار بدون مصرف سیلیکون به‌دست آمد (شکل ۵). با توجه به اینکه تنش خشکی اثر کاهشی بارزی بر عملکرد زیست‌توده داشته و تأثیر آن بر عملکرد دانه نسبتا کمتر بوده است، شاخص برداشت در تیمارهای تنش خشکی کاهش کمتری داشت.



شکل ۵- مقایسه میانگین شاخص برداشت کینوا در برهمکنش تیمارهای آبیاری و کود سیلیکون

Fig. 5. Mean comparison of harvest index of quinoa in interaction of irrigation and silicon fertilizer treatments

نتیجه‌گیری

نتایج این آزمایش نشان داد که تنش خشکی باعث کاهش محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی، محتوای آب نسبی برگ، عملکرد دانه و عملکرد زیست‌توده کینوا شد. در شرایط تنش خشکی فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی (کاتالاز، سوپراکسید دیسموتاز، پراکسیداز)، پرولین و کربوهیدرات‌های محلول افزایش یافت. مصرف کود سیلیکون باعث کاهش اثرات منفی تنش خشکی شد. در کلیه سطوح آبیاری، مصرف سیلیکون باعث بهبود صفات گیاهی کینوا شد، ولی این موضوع در تیمار ۴۰ درصد ظرفیت زراعی (تنش شدید خشکی) برای محتوای کلروفیل a، کلروفیل کل، فعالیت کاتالاز، پراکسیداز و محتوای آب نسبی در مقایسه با تیمار آبیاری ۱۰۰ درصد، دارای اثرگذاری مثبت بیشتری بود. در تیمار آبیاری ۴۰ درصد در مقایسه با تیمار ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی، میزان افزایش عملکرد دانه و زیست‌توده در تیمار سه لیتر در هکتار سیلیکون نسبت به شاهد بدون مصرف سیلیکون بیشتر بود. بر اساس نتایج به‌دست آمده، در تیمار ۴۰ درصد ظرفیت زراعی (تنش خشکی شدید)، مصرف سه لیتر در هکتار سیلیکون بر جلوگیری از کاهش عملکرد دانه کینوا بارزتر بود. نتایج این آزمایش نشان داد که هرچند تنش خشکی باعث کاهش خصوصیات فیزیولوژیکی و عملکردی کینوا شد، ولی با مصرف کود سیلیکون اثرات منفی تنش خشکی به طور چشمگیری کاهش یافت.

سپاسگزاری

بودجه ایـن پـژوهش از محـل اعتبـارات طـرح شـماره ۴۰۰/د/۱۱/۰۹/۶۱۹۰ مصوب شورای پژوهشی دانشگاه پیـام نور تأمین شده است که بدینوسیله سپاسگزاری می‌شود.

منابع مورد استفاده

References

Ahmed, M., Qadeer, U. and Aslam, M.A. 2011. Silicon application and drought tolerance mechanism of sorghum. *African Journal of Agricultural Research,* 6(3), pp.594- 607. http://doi.org/10.5897/AJAR10.626

Amjad, H., Noreen, B., Javed, A. and Nayyer, I. 2011. Differential changes in antioxidants, proteases, and lipid peroxidation in flag leaves of wheat genotypes under different levels of water deficit conditions. *Plant Physiology Biochemistry,* 49(2), pp.178-185. http://doi.org/10.1016/j.plaphy.2010.11.009

Angeli, V., Miguel Silva, P., Crispim Massuela, D., Khan, M.W., Hamar, A., Khajehei, F., Graeff-Hönninger, S. and Piatti, C. 2020. Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.): An overview of the potentials of the "golden grain" and socio-economic and environmental aspects of its cultivation and marketization. *Foods,* 9(2), 216. https://doi.org/10.3390/foods9020216

Arnon, A.N. 1967. Method of extraction of chlorophyll in the plants. *Agronomy Journal*, 23, pp.112-121.

Bagheri, N., Athakhi, Sh. and Razavizadeh, R. 2020. Investigating the effect of silicon on some morphological and physiological indicators and the expression of betaine aldehyde dehydrogenase and proline 5-carboxylate synthetase genes in Iranian borage medicinal plant under drought stress. *Journal of Plant Biological Sciences,* 12(43), pp.85-106. [In Persian]. doi: 10.22108/ijpb.2020.122181.1206

Bates, L.S., **Waldren, R.P. and Teare. I.D. 1973.** Rapid determination of free proline for water stress studies. Plant Soil. 39, pp.205-207. https://doi.org/10.1007/BF00018060

Bocharnikova, E.A., Loginov, S.V., Matychenkov, V.V. and Storozhenko, P.A. 2010. Silicon fertilizer efficiency. *Russian Agricultural Sciences,* 36, pp. 446–448. https://doi.org/10.3103/S1068367410060157

Caverzan A, Passaia G, Rosa SB, Ribeiro CW, Lazzarotto F. and Margis-Pinheiro M. 2012. Plant responses to stresses: Role of ascorbate peroxidase in the antioxidant protection. *Genetics and Molecular Biology,* 35(4suppl), pp.1011-9. https://doi.org/10.1590/s1415-47572012000600016

Dubois, M., Gilles, K.A., Hamilton, J.K., Rebers, P.T. and Smith, F. 1956. Colorimetric method for determination of sugars and related substances. *Analytical Chemistry*, 28(3), pp.350-356.

Gaur, A. Sharma, D., Sheoran, S., Chahal, S., Chaudhary, K., Singh, G. and Singh, G.P. 2021. Role of water-soluble carbohydrates in improving drought stress tolerance in wheat: An Overview. *Journal of Cereal Research,* 14 (Spl. 1), pp.1-16. http://doi.org/10.25174/2582-2675/2022/119850

Ghaffari, H., Tadayon, M.R. and Nadeem, M. 2019. Proline-mediated changes in antioxidant enzymatic activities and the physiology of sugar beet under drought stress. *Acta Physiologiae Plantarum,* 41(2), 23.

https://doi.org/10.1007/s11738-019-2815-z

Ghavamsaeidi Noghabi, S., Shahidi, A. and Homami, H. 2021. Estimation of water requirement and crop coefficient for hemp at different growth stages in Birjand plain. *Journal of Water Research in Agriculture,* 34(4), pp.563-573. [In Persian]. doi: 10.22092/jwra.2021.122794

Grieve, C. and Grattan, S. 1983. Rapid assay for determination of water-soluble quaternary ammonium compounds. *Plant and Soil,* 70, pp.303-307.

Gunes, A., Inal., A., Adak, M.S., Bagci, E. G., Cicek, N. and Eraslan, F. 2008. Effect of drought stress implemented at pre-or post-anthesis stage on some physiological parameters as screening criteria in chickpea cultivars. *Russian Journal of Plant Physiology,* 55(1), pp.59-67. https://doi.org/10.1134/S102144370801007X

Hattori, T., Inanaga, S., Araki, H., An, P., Morita, S., Luxová, M. and Lux, A. 2005. Application of silicon enhanced drought tolerance in *Sorghum bicolor*. *Physiologia Plantarum,* 123(4), pp.459-466. https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.2005.00481.x

Huang, X., Guo, W., Yang, L., Zou, Z., Zhang, X., Addo-Danso, S.D., Zhou, L. and Li, S. 2023. Effects of Drought stress on non-structural carbohydrates in different organs of *Cunninghamia lanceolata*. *Plants,* 12, 2477. https://doi.org/10.3390/plants12132477

Ibrahim, E.A., Ebrahim, N.E.S. and Mohamed, G.Z. 2023. Effect of water stress and foliar application of chitosan and glycine betaine on lettuce. *Scientific Reports,* 12;13, 17274. https://doi.org/10.1038/s41598-023-43992-0

Iqbal, H., Yaning, C., Waqas, M., Shareef, M. and Raza, S.T. 2018. Differential response of quinoa genotypes to drought and foliage-applied H_2O_2 in relation to oxidative damage, osmotic adjustment and antioxidant capacity. *Ecotoxicology and Environmental Safety,* 164, pp.344-354. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.08.004

Irfan, M., Maqsood, M.A., Rehman, H.u., Mahboob, W., Sarwar, N., Hafeez, O.B.A., Hussain, S., Ercisli, S., Akhtar, M. and Aziz, T. 2023. Silicon nutrition in plants under water-deficit conditions: Overview and prospects. *Water,* 15, 739. https://doi.org/10.3390/w15040739

Kim Y.H., Khan, A.L., Waqas, M. and Lee, I.J. 2017. Silicon Regulates Antioxidant Activities of Crop Plants under Abiotic-Induced Oxidative Stress: A Review. *Frontiers in Plant Science,* 6;8, 510. http://doi.org/10.3389/fpls.2017.00510

Kovács, S., Kutasy, E. and Csajbók, J. 2022. The multiple role of silicon nutrition in alleviating environmental stresses in sustainable crop production. *Plants,* 11, 1223. https://doi.org/ 10.3390/plants11091223

Maghsoudi, K., Emam, Y., and Pessarakli, M. 2016. Effect of silicon on photosynthetic gas exchange, photosynthetic pigments, cell membrane stability and relative water content of different wheat cultivars under drought stress conditions. *Journal of Plant Nutrition,* 39(7), pp.1001–1015. https://doi.org/10.1080/01904167.2015.1109108

Maruta, T. and Ishikawa, T. 2018. Ascorbate Peroxidase Functions in Higher Plants: The Control of the Balance Between Oxidative Damage and Signaling. *In:* Gupta, D., Palma, J. and Corpas, F. (Eds) Antioxidants and

Antioxidant Enzymes in Higher Plants. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-75088-0_3

Matichenkov, V.V. 2008. Silicon deficiency and functionality in soils, crops and food. 2th International Conference on Soil and Compost Eco-Biology, November 26 -29, 2008. Puerto de la Cruz, Tenerife. Spain.

Mostofa, M.G., Rahman, Md. M., Ansary, Md. M.U., Keya, S.S., Abdelrahman, M., Miah, Md. G. and Phan Tran, L.S. 2021. Silicon in mitigation of abiotic stress-induced oxidative damage in plants. *Critical Reviews in Biotechnology,* 41(6), pp.918–934. https://doi.org/10.1080/07388551.2021.1892582

Mukhtar, A., Asif, M. and Goyal, A. 2012. Silicon the non-essential beneficial plant nutrient to enhanced drought tolerance in wheat crop plant. *In:* Goyal, A. (Ed). IntechOpen. doi: 10.5772/45647.

Sairam, R.K., Deshmukh, P.S. and Saxena, D. C.1998. Role of antioxidant systems in wheat genotype tolerance to water stress. *Biologia Plantarum,* 41, pp.387-394. https://doi.org/10.1023/A:1001898310321

Saja-Garbarz D, Libik-Konieczny M, Janowiak F. 2024. Silicon improves root functioning and water management as well as alleviates oxidative stress in oilseed rape under drought conditions. *Frontiers in Plant Science,* 21, 15:1359747. https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1359747

Seleiman M.F., Al-Suhaibani, N., Ali, N., Akmal, M., Alotaibi, M., Refay, Y., Dindaroglu, T., Abdul-Wajid, H.H. and Battaglia, M.L. 2021. Drought stress impacts on plants and different approaches to alleviate its adverse effects. *Plants (Basel),* 10(2), pp.259. https://doi.org/10.3390/plants10020259

Shen, X., Zhou, Y., Duan, L., Li, Z., Eneji, A.E., and Li, J. 2010. Silicon effects on photosynthesis and antioxidant parameters of soybean seedlings under drought and Ultraviolet-B radiation. *Journal of Plant Physiology*, 167(15), pp.1248-1252. https://doi.org/10.1016/j.jplph.2010.04.011

Tale-Ahmad, S. and Haddad, R. 2011. Study of silicon effects on antioxidant enzyme activities and osmotic adjustment of wheat under drought stress. *Czech Journal of Genetics and Plant Breeding*, 47, pp.17-27. https://doi.org/10.17221/92/2010-CJGPB

Teixeira, G.C.M., de Prado, R.M. and Rocha, A.M.S. 2022. Action of silicon on the activity of antioxidant enzymes and on physiological mechanisms mitigates water deficit in sugarcane and energy cane plants. *Scientific Reports,* 12, 17487. https://doi.org/10.1038/s41598-022-21680-9

Ulloa, M., Nunes-Nesi, A., da Fonseca-Pereira, P., Poblete-Grant, P., Reyes-Diaz, M. and Cartes, P. 2021. The effect of silicon supply on photosynthesis and carbohydrate metabolism in two wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars contrasting in response to phosphorus nutrition. *Plant Physiology and Biochemistry,* 169, pp.236-248. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.11.022

Wang, M., Wang, R. and Mur, L.A.J. 2021. Functions of silicon in plant drought stress responses. *Horticulture Research,* 8, 254. https://doi.org/10.1038/s41438-021-00681-1

Zhang, W., Xie, Z., Lang, D., Cui, J. and Zhang, X., 2017. Beneficial effects of silicon on abiotic stress tolerance in legumes. *Journal of Plant Nutrition.* 40(15), pp.2224-2236. https://doi.org/10.1080/01904167.2017.1346127